

都市キャノピーにおける温位・CO₂・H₂O の鉛直分布と鉛直拡散係数

VERTICAL PROFILE AND TURBULENT DIFFUSIVITY OF AIR TEMPERATURE, CO₂, and H₂O WITHIN AND ABOVE A SUBURBAN CANOPY

森脇 亮¹・森泉孝信²・神田 学³

Ryo MORIWAKI, Takanobu MORIIZUMI and Manabu KANDA

¹正会員 博(工) 東京工業大学助手 理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²学生会員 工修 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻(同上)

³正会員 工博 東京工業大学助教授 理工学研究科国際開発工学専攻(同上)

This paper shows the seasonal dependency of vertical profile of air temperature, CO₂, and H₂O within and above a suburban canopy and the turbulent diffusivity of the scalars. The results were derived from field measurements of the vertical profiles and fluxes, which were conducted in a residential area (the mean height of canopy is 7.3 m) of Tokyo, Japan. The vertical profile of CO₂ in the daytime drastically varied with the season; the CO₂ concentration within the canopy was lower than that above the canopy in summer but was slightly higher in winter. The seasonal change of the daytime CO₂ profile is likely due to the effect of photosynthesis by vegetation in backyards. The normalized turbulent diffusivity of air temperature and CO₂ depended on height and atmospheric stability, which is similar to that for vegetated canopies. In contrast, the normalized turbulent diffusivity of H₂O was relatively smaller than that of heat and CO₂. Although the correlation coefficients indicated that the transfer efficiencies of CO₂ were generally smaller than that of heat, the magnitude of normalized turbulent diffusivity of air temperature and CO₂ was almost same.

Key Words : Vertical profile, turbulent diffusivity, scalar transport, urban canopy layer, field experiment

1. はじめに

草原や森林に比べ、都市接地層における乱流構造・フラックスに関する研究は依然として少ない。都市一大気間のエネルギー・物質輸送とそのメカニズムを把握することは、ヒートアイランド・大気汚染・強雨頻度の増加など様々な問題の本質を理解する上で重要であり、都市接地層における観測研究の充実化が望まれている。筆者らは東京大田区に位置する低層住宅街において早くから乱流・フラックスの長期観測を行ってきた(例えば、森脇・神田, 2005¹⁾)。これまで得られた熱収支、乱流構造、風速プロファイルなどの様々な結果から、都市キャノピーの微気象は植生キャノピーや平原のそれとは異なる特徴を有しており、建物で構成される粗度要素の3次元性が本質的に重要であることがわかってきた。特に近年では気温・二酸化炭素(以下CO₂)・水蒸気(以下

H₂O)濃度の鉛直分布の計測を強化しており、都市一大気間におけるスカラーの濃度形成および拡散過程の把握に力を入れている。これまで、日中の最高気温の出現高度が季節によって変化すること²⁾、冬季夜間の大気安定時に屋根面で冷却された空気塊がキャノピー内部に沈降しそれが高濃度CO₂を都市キャノピー内部に堆積させること³⁾、などを報告してきた。

本報はそれらの続報にあたるもので、その後に蓄積された夏季の観測データを含めて、都市キャノピー内外におけるスカラー濃度の形成プロセスについて議論する。前半では、温位・CO₂・H₂O濃度プロファイルの冬季と夏季の季節変化の特徴を報告する。また後半ではフラックスとプロファイルの同期計測データから算出したスカラーの乱流拡散係数の特徴について報告する。接地層における拡散係数は、地表-大気間のエネルギー・物質輸送を決定づける重要な物理量であり、無次元された拡散係数と大気安定度の関係式(シア関数)はメソ気象シ

ミュレーションの地表面境界条件にも用いられている。これまで、草原での観測に基づいて経験的に求められたシアー関数が広く用いられてきたが、これが3次元的に複雑で粗度要素の大きな都市域にも適用できるかは定かではない。都市域におけるスカラーの乱流拡散係数の実測データは世界的に見ても希有であり、気象・水循環予測の向上に役立つばかりでなく、大気汚染物質の拡散という観点からも非常に重要である。

2. 観測概要

観測サイトと計測手法については前報³⁾と重複する部分が多いため、以下では本論文のデータを解釈する上で必要な情報のみを示す。

(1) 観測サイト

観測タワーは東京都大田区久が原の住宅街のほぼ中央の住宅の庭に位置しており、交通量の多い幹線道路からは離れた場所にある。また約5m離れた距離にある生活道路は普段から交通量がほとんどなく、日中・夜間ともにほとんど人通りが無い。またタワーから最も近い家屋までの距離は約4mほどである。タワー近傍の地表は低木・芝生・土壌・コンクリート・アスファルトなどが混在しており、冬季は植生の大部分が枯れている。周辺の地域は1km四方に渡り高さのほぼ均一な低層住宅地（平均高さ7.3m）が広がっており、建蔽率は約33%である。風速分布や運動量の拡散係数を調べたMoriwaki and Kanda (2006)⁴⁾によれば、本サイトでは平均建物高さの3倍程度の高度においてほぼ接地層理論が成立することが分かっている。

(2) 計測手法

気温・CO₂・H₂O濃度の計測は、地上から平均建物高さの4倍の高度までの11高度（0.75, 3, 5, 7, 9, 11, 14, 17, 21, 25, 28 m）で行った。CO₂・H₂Oプロファイルの計測には、多点切り替えフローシステムと分析装置（Li-cor社；LI-7000）を用いた。バックグラウンド濃度の時間変化の影響を最小限に抑えるため、計測サイクルを短くする工夫がされている³⁾。気温分布の計測には極細の熱電対線を用いた。放射による影響を最小限に抑えるため極細の熱電対素線を細密溶接機にて温接点を溶接した。詳細に関しては、Kanda et al. (2005)²⁾および木本ら (2003)⁵⁾を参照されたい。

フラックス計測は三次元超音波風速温度計（Metek社；USA-1）とオープンパスCO₂/H₂Oアナライザー（Li-cor社；LI-7500）を用いて、都市キャノピー上の4高度（11, 15, 21, 29 m）で行った。3次元風速・気温・CO₂濃度・H₂O濃度の瞬間値を8Hzのサンプリング周期で計測し、渦相関法を用いてフラックスの算出を行った。

ただし、CO₂とH₂Oフラックスの計測は2高度のみ（21, 29 m）である。

以上の観測を冬季（2004年12月1日から2005年1月31日）と夏季（2005年8月1日から2005年9月30日）に集中して行った。

(3) 解析手法と使用するデータ

本研究では議論する全ての統計量を1時間平均値として扱っている。本論文において11時とは11:00～12:00のデータの平均を指すことにする。

晴天日の特徴を抽出するため、曇りまたは雨の日のデータは除去し、最寄りの気象官署である東京のデータを用いて日照率が80%以上である日を選定した。

a) 鉛直プロファイル

バックグラウンドの変化を無視するためタワー最高点（28m）を基準に高度方向の変化を算出した。またデータを時間帯によってグループ化し（日中：10時～14時、夜間：21時～翌4時）、それぞれのデータについてアンサンブル平均操作を行うことにより、日中および夜間の典型的なプロファイルを抽出した。

b) 鉛直拡散係数

拡散係数は物質の輸送量（フラックス）をその物理量勾配で割ることで求められる（式1）。

$$K = \frac{F_a}{\partial a / \partial z} \quad (1)$$

ここに、 a はある物理量を指し、 F はそのフラックスである。拡散係数は乱流強度や高さに依存しているので、無次元拡散係数がよく用いられる（式2）。

$$\phi^{-1} = \frac{K}{\kappa u_* z'} = \frac{K}{\kappa u_* (z - z_d)} \quad (2)$$

ここに、 u_* は摩擦速度、 z は測定高度、 z_d はゼロ面変位（=5.3m）である。

スカラーフラックスは21mと29mで有意な変化が認められないことから、フラックスには鉛直方向に変化が無いと仮定し両者の平均値を採用した。また物理量勾配は28mと21m、25mと17m、7・9・11・14mの3つの組み合わせを選定し、拡散係数の算出高度はそれぞれの組み合わせの中間高度（24, 21, 10m）で定義した。なおキャノピー近傍では勾配が大きくなるため、4高度のデータを用いて差分近似を行っている。

また拡散係数の算出では、データの品質を向上させるために、以下のようにしきい値を設定した。日照率で夏季65%以上、冬季80%以上とし、風向は190°から360°、風速は2.5ms⁻¹以上とした。フラックスで、下限値（顕熱・潜熱：20Wm⁻²、CO₂フラックス：0.1mgm⁻²s⁻¹）を設けている。また、物理量勾配ではその差が解像度（気温：0.02°C、CO₂：0.1ppm、H₂O：0.004mmol mol⁻¹）の5倍以上となるデータのみ使用した。これらの品質管理によって、各図におけるプロット数が異なることに注意されたい。

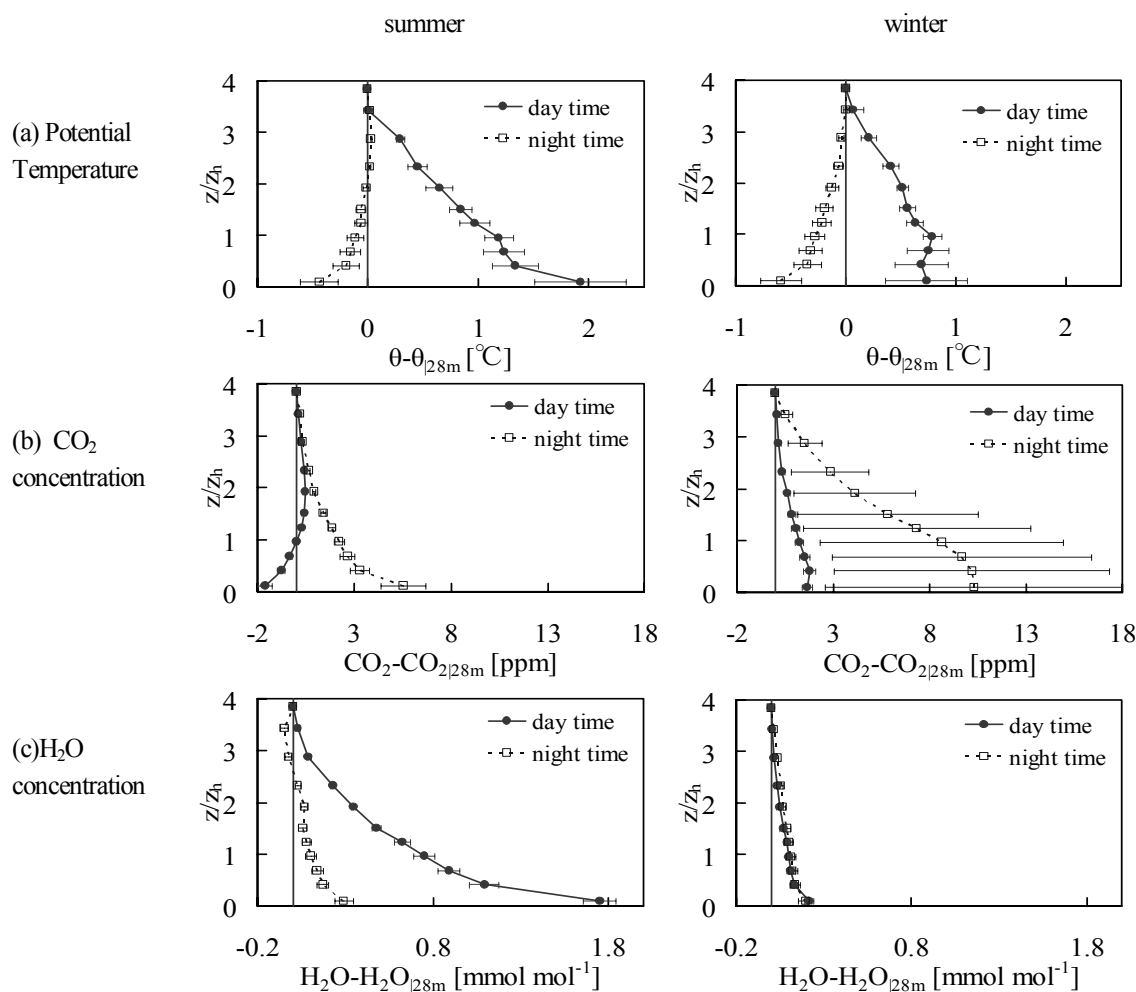


図-1 夏季及び冬季の(a)温位, (b)CO₂, (c)H₂Oのアンサンブル平均プロファイル (◆: 日中, □: 夜間)。
日中:10-14 時, 夜間21-翌4 時。誤差バーは標準偏差を示す。

3. スカラーの鉛直プロファイル

図-1は夏季及び冬季の温位, CO₂, H₂O分布を日中と夜間に分けて平均化してプロットしたものである。バックグラウンドの変化を無視するためタワー最高点(28m)を基準に高度方向の変化を, サンプルの標準偏差とともに示している。アンサンブル平均に使用したデータ数は, 夏季日中が29, 夏季夜間が48, 冬季日中が35, 冬季夜間が56であり, それぞれの平均的な気象条件などを表-1に示した。

(1) 温位

日中の温位の最大値は, 夏季は地表付近に現れるが, 冬季は屋根面付近に現れる。夏は太陽高度が高く日射がキャノピー内部まで差し込むが, 冬は太陽高度が低いために屋根面などキャノピー上部のみが温められるためである。都市域の温位プロファイルは, 都市キャノピーの3次元構造と太陽高度によって形成される複雑な日向・

日陰分布に起因することはすでに報告されているとおりである (Kanda et al., 2005³⁾)。

一方, 夜間においてはキャノピー内 ($z/z_h < 1$) で夏季・冬季ともに逆転層が形成されているが, キャノピー上空 ($z/z_h > 1$) では傾向が若干異なる。冬季は逆転層が上空でも維持されているが, 夏季は勾配がほぼ無くなり中立に近い状態または弱不安定状態となる。夏季には, 日中に建物に蓄熱された熱が夜間に放出されることにより, キャノピー上では大気が不安定化しやすいと考えられる。冬季に上空まで安定化するのは, 日中の貯熱量が小さい結果, 夜間の放熱量も小さくなるためだと考えられる。

(2) CO₂

夏季の日中はキャノピー内で下方ほど濃度が低い。Moriwaki and Kanda (2004)⁶⁾によるフラックス計測によれば本地域はCO₂の排出源であるが, この時期はキャノピー底部(家屋の庭)に存在する植え込みや芝生が展葉し, また太陽高度が高くここに日射が差し込む状況であるため, 光合成によってキャノピー底面付近はCO₂の

表-1 鉛直プロファイルに用いたデータセットの平均的な気象条件とフラックス

			Rb	U (m s^{-1})	WD (deg.)	CO_2 (ppmv)	H_2O (mmol mol^{-1})	Air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	CO_2 flux ($\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	LE (W m^{-2})	H (W m^{-2})
夏季	日中	平均	-0.060	4.9	164	395	24.33	30.6	0.18	220.4	224.9
		標準偏差	0.047	1.7	29	18	1.84	1.1	0.20	77.3	43.1
	夜間	平均	0.042	3.1	205	405	28.26	25.6	0.09	11.2	-0.5
		標準偏差	0.100	1.5	39	15	1.22	1.2	0.05	17.4	5.2
冬季	日中	平均	-0.061	4.0	229	407	3.93	9.5	0.20	33.0	118.1
		標準偏差	0.118	2.4	113	21	1.77	2.9	0.19	14.1	41.6
	夜間	平均	0.057	3.8	302	427	4.08	5.2	0.16	6.6	-3.7
		標準偏差	0.093	2.2	75	34	1.16	2.8	0.12	4.6	10.9

吸収源になっていると考えられる。ただし、キャノピー上では濃度勾配が逆転しており、これは家屋などから排出される人為起源の CO_2 に起因していると考えられる。 CO_2 の発生源と吸収源が混在している住宅街キャノピーの特徴を反映しており興味深い。冬季日中にはこのような傾向は見られず、その理由として1)植生の多くが枯れていること、2)太陽高度が低くキャノピー底部が日陰になること、の両者が挙げられる。

一方、夜間は地表に近いほど CO_2 濃度が増加している。冬季夜間には高濃度の CO_2 がキャノピー内部で一様化しており、これは前報など^{3), 7)}で述べたとおり、屋根面からの冷氣沈降が家屋の換気扇などから排出された高濃度 CO_2 をキャノピー内に堆積させるためである。夏季夜間の濃度分布の形状は冬季のそれとは異なり、地表面近傍を除けば濃度は高度と共に減少する。前項で述べたように、夏季夜間は屋根面付近から上では大気が不安定化しやすいため、冬季のような冷氣沈降が生じず、家屋から排出された CO_2 が上空に拡散されやすいことが一つの理由である。また夏季には家屋からの CO_2 排出自体が冬季に比べ少なくなること⁶⁾も一つの理由である。

(3) H_2O

H_2O プロファイルに共通するのはキャノピー底部で濃度が高く、その上では濃度が低下することである。本地域における主な H_2O の排出源は庭木や土壌面であり⁷⁾、これに応じたプロファイルが形成されている。ここで特筆すべきは夏季日中の大きな濃度勾配である。夜間よりも熱対流が活発である時間帯にもかかわらず濃度差が大きいのは、オアシス効果により庭木や植え込みからの蒸発が促進され、大量の H_2O がキャノピー底部で放出されている⁹⁾からだと考えられる。もう一つの可能性としては大気境界層上空からの乾燥空気の連行により、乱流拡散の影響を受けにくいキャノピー底部を除いて、 H_2O 濃度が低下するためかもしれない。

4. スカラーの鉛直拡散係数

(1) 無次元拡散係数の高度依存性

図-2は(a)熱、(b) CO_2 、(c) H_2O の無次元拡散係数と大気安定度の関係を示しており、 $1.4z_h$ 、 $2.8z_h$ 、 $3.4z_h$ の3高度で求めたものを並べた。誤差バーは勾配がセンサーの解像度 (2 (3) 参照) 分だけ変化した場合のとりうる値を示している。全体の傾向として無次元拡散係数は不安定時に大きく安定時に小さくなる傾向がある。熱と CO_2 は $3z_h$ 付近では従来から提案されてきたシア関数 (Dyer and Hicks, 1970⁸⁾; Businger et al., 1971⁹⁾) に近い値を示すが、測定高度が下がるにつれて無次元拡散係数が大きくなる傾向が見られる。キャノピー近傍では大きな凹凸によって作られた乱れが勾配型拡散で予測される以上のスカラー輸送を引き起こしているためと考えられ、同様の傾向は、森林キャノピーにおいても熱の拡散係数について報告されている (例えば, Coppin et al., 1986¹⁰⁾)。

一方、 H_2O の無次元拡散係数はキャノピー近傍においてその値が小さい。この理由は定かでないが、一つの理由としては、前章で述べたように、発生源の位置がスカラーによって異なることと関係しているかもしれない。熱や CO_2 の発生源は屋根面や換気扇などキャノピー上部に位置するが、これに対し、 H_2O の発生源はキャノピー底部に偏在している。キャノピー上部に発生源が位置する熱や CO_2 は比較的大きなスケールの乱流渦によって効率的に上空に輸送される (無次元拡散係数が大きくなる) が、キャノピー底部に発生源が位置する H_2O は輸送に寄与する乱流渦のスケールが空間的に限られるため無次元拡散係数が小さくなる可能性がある。また一方で、本研究では晴天日のデータのみを使っているため、大気境界層上端でのエントレインメント、あるいは高気圧下における沈降流によって上空の乾燥空気が境界層内に輸送され、(潜熱フラックスとしては感知されずに) 地表

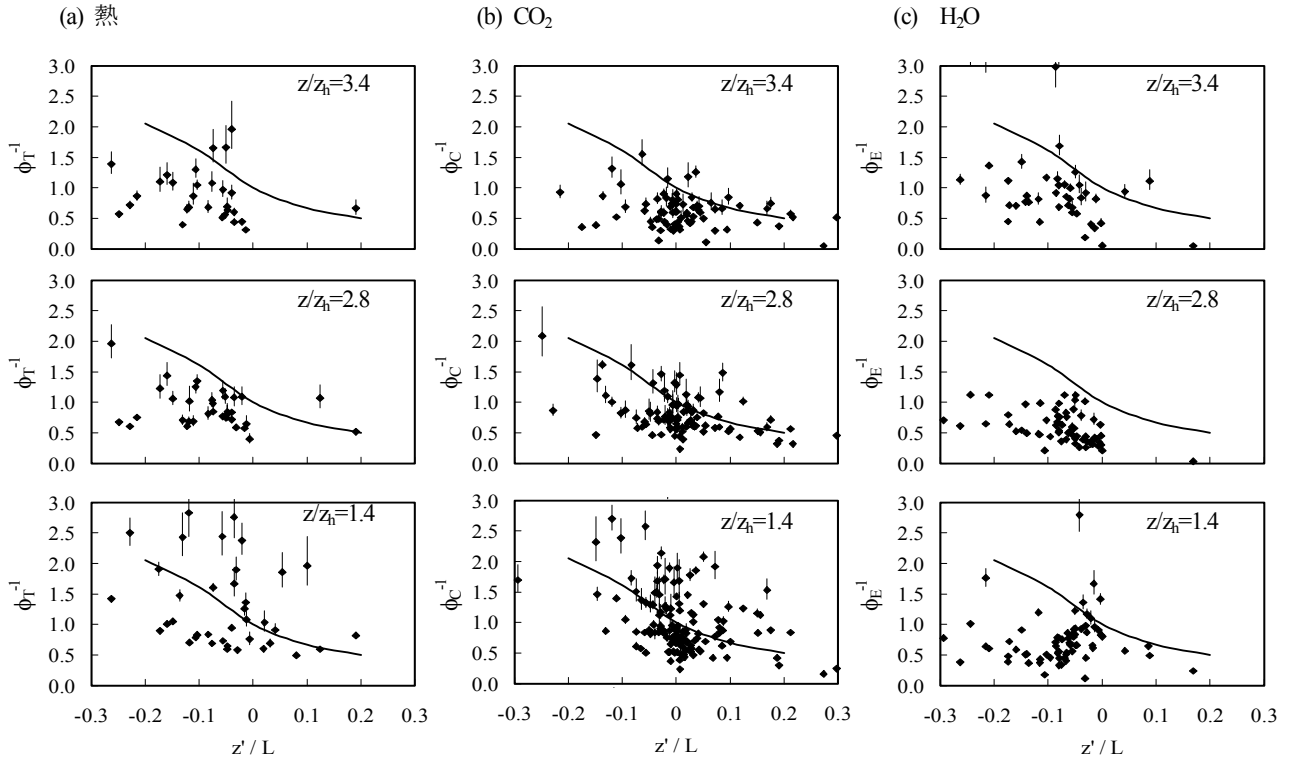


図-2 異なる高度における(a)熱, (b)CO₂, (c)H₂O の無次元拡散係数と大気安定度. 高度は平均建物高さで無次元化し, それぞれのグラフに示した. 実線は既存の無次元拡散係数 (Dyer and Hicks, 1970⁸⁾, Businger et al., 1971⁹⁾) を示す.

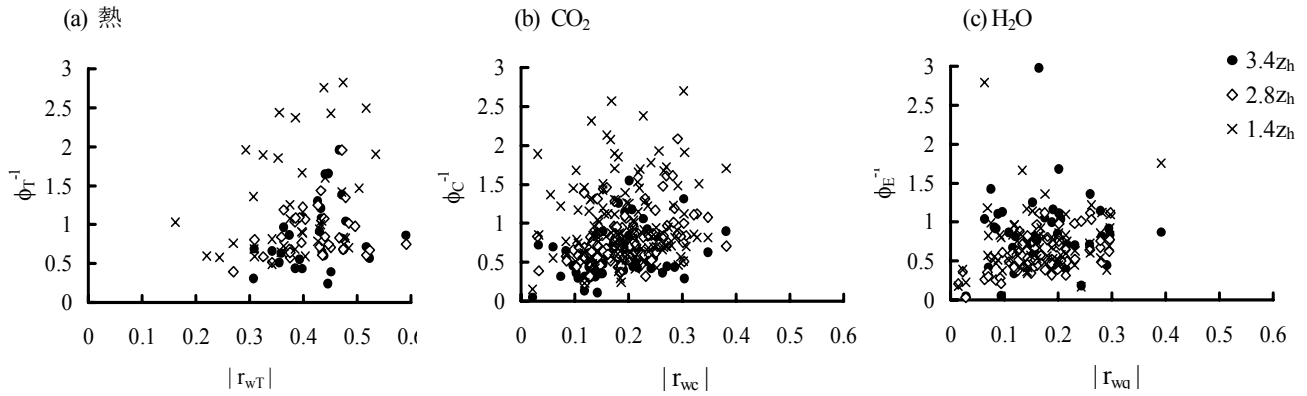


図-3 無次元拡散係数と乱流相関係数の関係 (a)熱, (b)CO₂, (c)H₂O.

付近の濃度勾配のみを大きくしている可能性も考えられる.

(2) 無次元拡散係数と相関係数の関係

次に, 前節で示した乱流拡散係数と乱流相関係数の関係について議論する. 相関係数は輸送効率の指標としてよく用いられている統計量であり (Roth and Oke, 1995¹¹⁾, Moriwaki and Kanda, 2006¹²⁾), 例えば熱の相関係数は鉛直風速と気温から, 以下のように定義される.

$$r_{wT} = \overline{w'T'} / \sigma_w \sigma_T \quad (3)$$

ここに, σ_T は気温の標準偏差を示す. H₂O, CO₂についても同様に r_{wq} , r_{wc} が定義できる. 相関係数は輸送効率として従来から広く用いられてきた指標であるため, 本研究で新たに得られた拡散係数と相関係数の関係を調べることは接地層研究にとって有益な情報である. また, テイラーの乱流凍結仮説を用いれば, 物理量の時間的変化は空間的变化に置き換えられるため, 相関係数は鉛直フラックスと物理量の水平方向変動との関係を示す指標

となる。一方、乱流拡散係数は式(2)から明らかなように、鉛直フラックスと鉛直方向の物理量勾配との関係である。したがって、両者の関係を調べることで、スカラーの乱流輸送特性に対する理解をより深くすることができる。

図-3に各スカラーの無次元拡散係数と相関係数の関係を示す。CO₂やH₂Oの相関係数（横軸）の値は0～0.4の範囲にあり、熱に比べて小さくなる傾向がある。Katul et al. (1995)¹³⁾は発生源の空間的非一様性がフラックスに寄与しない濃度変動を大きくする（つまり相関係数を小さくする）と述べている。本地域で発生源が点在化しているCO₂やH₂Oにはそれと同様の議論が当てはまり、熱に比べCO₂やH₂Oの相関係数が小さくなるのがMoriwaki and Kanda (2006)¹²⁾によって指摘されているとおりである。一方、前章でも述べたとおり、拡散係数については熱とCO₂でその値に大きな差異が認められない。式(2)で示したように、拡散係数はフラックスと鉛直勾配の比から求められる統計量であるため、発生源の空間的非均一性は濃度の鉛直勾配には寄与せず、フラックスは濃度勾配に従って輸送され则认为られる。地表面フラックスの非均一性がフラックスと濃度勾配の関係にはあまり影響を及ぼさないことは、Asanuma and Brutsaert (1999)¹⁴⁾の理論的検討によって指摘されており、これを実証する結果になっていると考えられる。

5. 結論

本研究ではタワー観測より都市域において熱・CO₂・H₂Oという3つのスカラーの鉛直分布およびフラックス計測を実施し、夏季・冬季のプロファイルおよび乱流拡散係数について以下のような結果を得た。

- 1) 両季節における日中・夜間の平均的な鉛直分布形状は物理量によって異なり、それぞれの発生源、吸収源の位置およびキャノピー内外の微気象の影響を強く反映する。
- 2) スカラーの無次元拡散係数は不安定時に大きく安定時に小さくなる傾向がある。熱とCO₂は3 m付近では従来から提案されてきたシア関数に近い値を示すが、測定高度が下がるにつれて無次元拡散係数が大きくなる傾向がある。一方、H₂Oの無次元拡散係数はキャノピー近傍においてその値が小さい。
- 3) CO₂やH₂Oの相関係数の値は熱に比べて小さくなる傾向があるが、拡散係数については熱とCO₂でその値に大きな差異は認められない。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金若手研究（B）（課題番号：16760404）、科学技術振興機構・戦略的創造研究（代表：神田学）による財政的援助を受けた。また観測場所の提供には、宗教法人カトリックお告げのフランシスコ修道会（代表：釘宮禮子様）に多大なるご協

力をいただいた。ここに合わせて謝意を表す。

参考文献

- 1) 森脇 亮, 神田 学: 住宅街における熱収支とCO₂フラックスの年間積算値, 土木学会水工学論文集, Vol.49, pp.361-366, 2005.
- 2) Kanda, M., Moriwaki, R. and Kimoto, Y.: Temperature profiles within and above an urban canopy, *Bound.-Layer Meteorol.*, Vol.115, pp.499-506, 2005.
- 3) 森脇 亮, 神田 学: 住宅街における冬季夜間の局所的冷氣沈降とスカラー濃度プロファイルの形成機構, 土木学会水工学論文集, Vol.50, pp.493-498, 2006.
- 4) Moriwaki, R. and Kanda, M.: Flux-gradient profiles for momentum and heat over an urban surface, *Theor. Appl. Climatol.*, Vol.84, pp.127-136, 2006.
- 5) 木本由花, 森脇 亮, 神田 学: 長期観測に基づいた都市キャノピー内外における温位プロファイル特性, 土木学会水工学論文集, Vol.48, pp.163-168, 2004.
- 6) Moriwaki, R. and Kanda, M.: Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area. *J. Appl. Meteorol.*, Vol.43, pp.1700-1710, 2004.
- 7) Moriwaki, R., Kanda, M., and Nitta, H.: Carbon dioxide build-up within a suburban canopy layer in winter night, *Atmos. Env.*, Vol.40, pp.1394-1407, 2006.
- 8) Dyer, A.J. and B.B. Hicks: Flux gradient relationship in the constant flux layer, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, Vol.96, pp.715-721, 1970.
- 9) Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, Vol.28, pp.181-189, 1971.
- 10) P. A. Coppin, Raupach, M. R. and Legg, B. J.: Experiments on scalar dispersion within a model plant canopy part II: An elevated plane source, *Bound.-Layer Meteorol.*, Vol.35, pp.167-191, 1986.
- 11) Roth, M. and Oke, T.R.: Relative efficiencies of turbulent transfer of heat, mass, and momentum over a patchy urban surface, *J. Atmos. Sci.*, Vol.52, pp.1863-1874, 1995.
- 12) Moriwaki, R. and Kanda, M.: Local and global similarity in turbulent transfer of heat, water vapor, and CO₂ in the dynamic convective sublayers over a suburban area, *Bound.-Layer Meteorol.*, Vol.120, pp.163-179.
- 13) Katul, G., Goltz, S. M., Hsieh, C-I, Cheng, Y., Mowry, F. and Sigmon, J.: Estimation of surface heat and momentum fluxes using the flux-variance method above uniform and non-uniform terrain, *Bound.-Layer Meteorol.*, Vol.74, pp.237-260, 1995.
- 14) Asanuma, J. and Brutsaert, W.: The effect of chessboard variability of the surface fluxes on the turbulence fields in a convective atmospheric surface layer, *Bound.-Layer Meteorol.*, Vol.91, pp.37-50, 1999.

(2006. 9. 30受付)